



Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 12, 2008. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL HIDRÁULICO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR MICROTURBINAS MEDIANTE HERRAMIENTAS SIG - VALLE DE LERMA (SALTA).

Belmonte, S.¹, Viramonte, J.², Nuñez, V.³, Franco, J.⁴

Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED) - Instituto GEONORTE –
Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)
Consejo de Investigación Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) –
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Avda. Bolivia 5150. CP 4400 – Salta - Tel. 0387-4255438. E-mail: silvibel@unsa.edu.ar

RESUMEN: Este trabajo presenta los modelos desarrollados para el mapeo del potencial hidroeléctrico en el Valle de Lerma, Salta. El modelado digital fue realizado en contexto SIG (Sistemas de Información Geográfica), aprovechando particularmente el concepto de acumulación espacial por pixel (módulo 'runoff') y otras herramientas de procesamiento del programa Idrisi KilimanjaroTM. Como insumos de entrada se obtuvieron capas temáticas representativas de: factor de infiltración (basadas en textura de los suelos y unidades de cobertura-usos del suelo), volumen de entrada de agua, modelo digital de elevación, derrame anual, caudal medio y desnivel topográfico. Las variables utilizadas para la evaluación del potencial hidráulico resultaron: potencial hidroeléctrico teórico bruto - energía teórica anual a potencia continua para nivel de resolución pixel, y densidad de potencia hidroeléctrica - potencial técnico aprovechable por subcuencas. El mapeo permitió detectar un alto potencial hidráulico para el aprovechamiento energético por microturbinas en el área montañosa del Valle de Lerma.

PALABRAS CLAVES: potencial hidráulico, microturbinas, SIG, subcuencas, energías renovables, Valle de Lerma.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo forma parte de la investigación "Evaluación Multi-Criterio para el uso alternativo de Energías Renovables en la Ordenación Territorial del Valle de Lerma"⁵. La determinación del potencial energético renovable resulta uno de los componentes claves en el proceso de evaluación, ya que permite definir la aptitud del territorio para la aplicación de diversas aplicaciones renovables. Siendo el eje conductor del trabajo el Ordenamiento Territorial (OT), y dado que el proceso es desarrollado en un entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica), es necesario disponer de toda la información de base en formato digital raster. Al igual que para las otras fuentes energéticas renovables (solar, eólica, biomásica), existen sólo unos pocos registros con datos puntuales para estimar el potencial hidráulico en el área de estudio –Valle de Lerma, Salta, Argentina-. Para contrarrestar esta dificultad, surge como alternativa el desarrollo de modelos instrumentales que permiten la estimación y el mapeo de dichas variables.

En trabajos anteriores ya fueron publicados las metodologías de mapeo y los resultados obtenidos para la estimación del potencial solar (Belmonte et al, 2006a) y eólico (Belmonte et al, 2006b). Diversos software y técnicas de procesamiento digital fueron integrados para el desarrollo de estos modelos.

Muguerza (2005) reconoce dos etapas para el análisis del recurso hídrico: la primera de carácter macro regional, orientada a identificar la aptitud del recurso y seleccionar las áreas de interés para su aprovechamiento con fines hidroeléctricos y, la segunda, con carácter localizado, destinada a seleccionar y evaluar el potencial de distintos emplazamientos, en este caso, de microcentrales hidroeléctricas en los cursos de agua dentro de las áreas de interés seleccionadas.

En el presente trabajo, al igual que para la evaluación de las otras fuentes renovables, se realiza una evaluación general macro del recurso hidráulico. Esto implica una escala de aproximación regional, orientada a la definición de sectores (subcuencas) con posibilidades de aprovechamiento hidroeléctrico. Estudios posteriores deberán desarrollarse puntualmente para establecer la ubicación exacta de los emplazamientos, definir tipos de tecnología a aplicar, acordar niveles de producción conforme a la demanda y minimizar impactos y riesgos ambientales.

¹ Becaria Postgrado CONICET.

² Investigador superior CONICET - Director del Instituto GEONORTE

³ Investigador CIUNSa – Director del Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED)

⁴ Investigador CONICET.

⁵ Doctorado en Ciencias orientación Energías Renovables. Doctorando: Ing. Silvina Belmonte.

Los límites del área de trabajo (Valle de Lerma, Salta) fueron definidos con un criterio de cuencas hidrográficas, asumiendo que las mismas constituyen unidades de planificación y análisis más adecuadas para trabajar con los recursos naturales en forma integrada y sistémica (Ramakrishna, 1997) que las definidas tradicionalmente por los límites político-administrativos. Así las divisorias de aguas en los cordones montañosos (que alcanzan altitudes superiores a los 5000 msnm por el O-NO y de aproximadamente 2000 msnm en las vertientes del E) definen naturalmente el área de trabajo. En la zona sur, el cierre fue definido por el estrechamiento natural del valle que lo vincula con otra unidad ambiental -de características fisonómicas, naturales y socio-culturales diferentes-: las Sierras de Aconquija y los Valles Calchaquíes. De la misma manera, las cuencas del río Toro y río Escoipe, cuya divisoria de aguas se extiende hasta la Puna salteña, fueron consideradas a partir de su entrada al Valle de Lerma.

Dentro del área de estudio se identifican dos sistemas hidrográficos principales: Cuenca del Río Bermejo y Cuenca del Río Juramento. El primero corresponde al sistema del Río Paraguay, mientras que el Río Juramento se integra al sistema del Río Salado, ambos pertenecientes al gran sistema Paraná-Plata de Sudamérica.

OBJETIVOS

- Evaluar la posibilidad de aprovechamiento hidroeléctrico en el Valle de Lerma a nivel de sub-cuencas, a partir de la generación de mapas continuos de potencial hidráulico.
- Desarrollar una metodología de mapeo para el potencial hidráulico en contexto SIG, que pueda transferirse y aplicarse a situaciones geográficas diversas.

DEFINICIONES CONCEPTUALES Y CONSIDERACIONES BÁSICAS

La posibilidad de aprovechamiento energético del recurso hidráulico a nivel exploratorio, depende básicamente de dos variables: diferencia de potencial topográfico y disponibilidad de agua. Como indicadores que permiten evaluar el potencial hídrico de una región, Muguerza (2005) define:

- **Potencial Hidroeléctrico Teórico Bruto (P.H.T.B.):** Representa la potencia total entregada por el caudal de agua al discurrir por un cauce general, desde una cota superior a una inferior (desnivel) y admitiendo que no hay pérdidas de ninguna naturaleza. Matemáticamente la potencia continua desarrollada en una cuenca aguas arriba de una dada sección de control, resulta de integrar los productos de caudal y desnivel que aportan las subáreas en que se divida la subcuenca y luego agregar todas las subcuencas que aportan sobre dicha sección de control.
- **Densidad del P.H.T.B. (D.P.H.T.A.):** El potencial bruto (valor agregado) es referido a la superficie de las cuencas o a la longitud de los cauces principales, de manera de visualizar mejor la calidad de los diversos sectores para su explotación energética.
- **Potencial Hidroeléctrico Técnico Aprovechable (P.H.T.A.):** Potencial real con factibilidad técnica de aprovechamiento, que implica el supuesto de que todo el caudal disponible se destina a la producción de energía. Representa una cifra independiente de la tecnología a utilizar, rendimientos, limitaciones topográficas, etc. Si bien es un indicador más representativo de la realidad, requiere de información y experiencias de campo, que hasta el momento sólo se han desarrollado para cuencas europeas con capacidad hidrogenadora comprobada en la práctica.

Para la evaluación del potencial hidráulico en el Valle de Lerma, se toman en consideración los siguientes criterios:

- Los cursos de agua son de régimen torrencial condicionados por la existencia de dos estaciones hidrológicas muy marcadas (época seca mayo-octubre, época lluviosa noviembre-abril). Este régimen implica una alta variabilidad en los caudales de flujo: con picos máximos y de acarreo de mucho material (en respuesta a elevadas intensidades de lluvia y con tiempos de retardo variables) y cursos temporales de diferente orden con cauces secos en los períodos de estiaje. Por estas condiciones particulares, y en coincidencia con la bibliografía (Muguerza, 2005), se propone como indicador para la estimación de la disponibilidad de agua los valores medios anuales de caudal.
- Por la escasez de datos de aforo en el área de trabajo, es necesario el desarrollo de modelos digitales para la espacialización de las variables en estudio. En este sentido, metodologías desarrolladas para el cálculo de caudales máximos con herramientas SIG (Belmonte y Núñez, 2006a; 2006b), resultan aplicables y transferibles a este caso particular de estimación del derrame anual, caudal medio anual y desnivel topográfico para la definición del potencial hidroeléctrico bruto.
- La utilización del módulo Runoff del programa Idrisi Kilimanjaro TM (2004), permite la estimación de caudales en modelos de acumulación espacial de los volúmenes de agua por pixel. En esta aplicación cada pixel es considerado conceptualmente como la mínima unidad de cuenca, resultando los valores de caudal estimados por cuencas y subcuencas de los caudales acumulados pixel a pixel dentro de las mismas. Para la acumulación de unidades de agua por pixel, el módulo *runoff* se basa en un Modelo Digital de Elevación (MDE) y permite incorporar los factores: precipitaciones, permeabilidad del suelo y *pit removal* (remoción de depresiones inexistentes en el terreno generados por la interpolación de datos altitudinales). Mediante el desarrollo de estos modelos es posible obtener valores estimativos de escurrimiento sobre cauces naturales, cierres de cuenca, cruces especiales, secciones de control o cualquier unidad de análisis lineal o

poligonal que interese. Este método fue probado para la estimación de caudales máximos con excelentes resultados (Belmonte y Núñez, 2006a; 2006b).

MODELADO DEL POTENCIAL HIDRÁULICO

El esquema metodológico de la Figura 1 resume los insumos y etapas de procesamiento para el modelado digital del recurso energético hidráulico con herramientas SIG. El modelado hidráulico fue desarrollado básicamente con herramientas del software Idrisi Kilimanjaro TM. Para funciones de digitalización y gestión de bases de datos, complementaron el proceso: programas CAD, planillas de cálculo y software Carta Link TM. La presentación de los resultados y su integración en el SIG general del Valle de Lerma se realizó en formato Arc Map 9.0 TM.

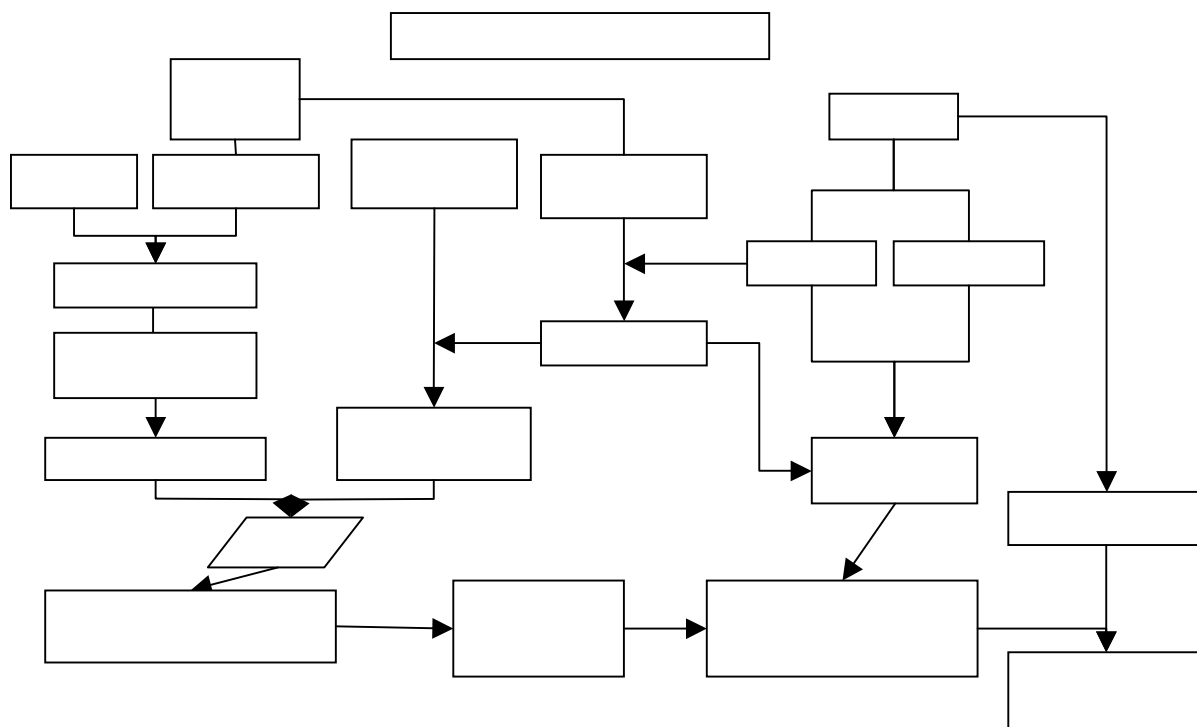


Figura 1. Esquema metodológico para el modelado espacial del potencial energético hidráulico con SIG.

CÁLCULO DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO TEÓRICO BRUTO (P.H.T.B)

Estimación del derrame anual y caudal medio: Fueron estimados mediante el módulo *runoff* detallado anteriormente y ajustados mediante correlaciones con series hidrológicas de aforo.

Los insumos utilizados para el modelado del derrame anual fueron:

- 1- MDE generado a partir de datos de la NASA (2006);
- 2- Volumen de entrada de agua al modelo: resultante de multiplicar el mapa de precipitación media anual (Belmonte et al, 2004) por una imagen del área real del pixel (proyección horizontal ajustada por pendiente);
- 3- Factor de infiltración: Calculado a partir del método conceptual de Curva Número (Villanueva et al, 2002) que considera los grupos hidrológicos de suelos (características de textura) y las clases de cobertura (tipo y condición hidrológica). La capa temática de cobertura-usos del Valle de Lerma (actualizada con imágenes satelitales a partir de Menéndez, et al, 2002) y las unidades de suelo (digitalizadas a partir de Nadir y Chafatinos, 1990) fueron reclasificadas y combinadas mediante tabulación cruzada y una función de potencia para la definición del valor correspondiente de CN –valor adimensional- (Tabla 1). Con este valor se estimó la lámina de absorción potencial (*S*) en mm [1], para finalmente mediante una relación con índices de infiltración (Vich, 1999; Villanueva et al, 2002) definir el factor de infiltración requerido por el modelo (Tabla 2).

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad [1]$$

- 4- Función *pit removal*: Activada para remover las depresiones inexistentes en el terreno generadas por la interpolación de datos altitudinales (Idrisi Kilimanjaro, 2004).

ID	Unidades de uso y cobertura del suelo del Valle de Lerma	Tipo de cobertura o uso (según Tabla CN)	Condición hidrológica	Clases de suelo			
				A	B	C	D
				Valor de CN			
1	Cursos agua	Sup impermeable		74	84	90	92
2	Represas	Sup impermeable		74	84	90	92
3	Parcelas agrícolas	Cultivos anuales	Buena	58	72	81	85
4	Aeropuerto	Caminos pavimentados		98	98	98	98
5	Áreas urbanas	Casa y patios		59	74	82	86
6	Suelo desnudo y playas de río	Caminos tierra		72	82	87	89
7	Veg rala de laderas	Pradera	Mala	68	79	86	89
8	Pastizales serranos	Pradera	Regular	49	69	79	84
9	Arbustales y matorrales	Pradera	Buena	39	61	74	80
10	Chaco serrano y transición	Bosques y montes	Regular	36	60	73	79
11	B.M. subhúmedo	Bosques y montes	Buena	25	55	70	77
12	B.M. húmedo	Bosques y montes	Buena	25	55	70	77

Tabla 1. Valores de CN en función de las unidades de cobertura-uso y clases de suelo del Valle de Lerma. Valores de CN tomados de Villanueva et al (2002).

Grupo Hidrológico de Suelos (CN)	Textura del suelo	Grado de permeabilidad	Infiltración ⁶ (mm/h)	Factor de infiltración para Valle de Lerma ⁷
D	a, aL, aA, FaL	Muy lenta	1.5 - 3	0.0017
C	FaAf, Fa, FLf	Lenta	3 - 5	0.0030
B	F, FLg, FaAg, L	Moderadamente lenta	5 - 16	0.0078
	FA	Moderada	16 - 50	0.0244
A	AF	Moderada rápida	50 - 160	0.0776
	A	Rápida	160 - 500	0.2439
		Muy rápida	> 500	0.4664

Tabla 2. Factor de infiltración estimado para clases de suelo del Valle de Lerma

Ajuste con estaciones de aforo: Mediante una comparación entre los valores de derrame anual y registros estadísticos de aforo para 11 estaciones en el Valle de Lerma (Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable, 1997) se observó una sobreestimación por el modelo generado con runoff en las salidas de cuencas con mayores acumulaciones de agua. Un análisis de correlación y regresión entre ambas variables (datos estimados y registros estadísticos) permitió definir una ecuación de ajuste para el modelo. La distribución de los datos y la ecuación de regresión polinomial aplicada al modelo ($r^2=0.98$) se presentan en la Figura 1.

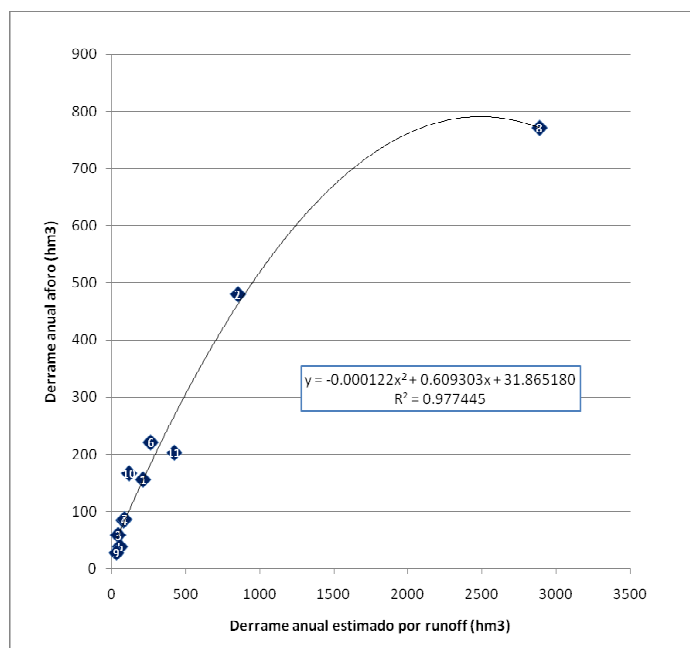


Figura 1. Ajuste estadístico del derrame anual con estaciones de aforo

Referencias:

Estaciones de aforo		
ID	RÍO	LUGAR
1	Las Nieves	El Volcán
2	Mojotoro	El Angosto
3	San Alejo	San Alejo
4	Santa Rufina	Santa Rufina
5	Yacones	Desemb. al Nieves
6	Arenales	Potrero de Díaz
7	Arenales	Salamanca
8	Arias	San Gabriel
9	Blanco	Dique Nivelador
10	Corralito	Peñas Bayas
11	Toro	Campo Quijano

⁶ En el caso del modelado digital desarrollado, el valor de infiltración fue estimado a través de la lámina de absorción potencial que considera no sólo la textura del suelo sino también las condiciones de cobertura, como se explicitó en el texto.

⁷ Factor estimado en función de punto medio en rangos de infiltración y precipitación máxima del área de estudio.

Cálculo de caudal medio anual: Dado que el dato requerido para el cálculo del potencial hidroeléctrico es el caudal medio anual, se aplicó la ecuación [2] a la capa temática de derrame anual (D). De esta manera se estimó el caudal medio anual por píxeles acumulados (Q). El factor utilizado sintetiza las conversiones de unidades de volumen y tiempo.

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = D \left[hm^3 \right] * 0.0321 \quad [2]$$

Desnivel topográfico: Para inducir el **desnivel topográfico real (gradiente de altura)** en el área de trabajo, se aplicaron fórmulas trigonométricas desarrolladas en el contexto SIG para el cálculo del tiempo de concentración en la estimación de caudales máximos (Belmonte y Núñez, 2006a; 2006b). El gradiente de altura (H), resulta directamente proporcional al producto de la longitud corregida con aspecto-orientación (L_a) y la tangente de la pendiente en radianes (α) [3; 4].

$$H = L_a * \tan \alpha \quad [3]$$

Siendo

$$L_a = \frac{r}{\cos \alpha_a} \quad [4]$$

y

r = IFOV (Campo Instantáneo de Vista, lado del píxel en el terreno) y
 α_a = ángulo de aspecto en radianes.

Los insumos necesarios para el cálculo, mapas de pendiente y orientación fueron obtenidos con módulos específicos para estas variables topográficas del programa Idrisi Kilimanjaro, a partir del MDE. La orientación fue reclasificada en octantes y normalizada para el cálculo del ángulo de aspecto utilizado para la corrección de la longitud. El gradiente de altura fue calculado para el mismo nivel de resolución de las imágenes de base, siendo la unidad el píxel (30*30 m).

Potencia Continua: Mediante la aplicación de la fórmula [5] (Muguerza, 2005) en el contexto SIG (módulo calculadora geográfica de software Idrisi Kilimanjaro), se estimó en formato raster la potencia continua en W.

$$P_i = 9.81 * Q_{ij} * H_{ij} \quad [5]$$

Donde

P_i = potencial bruto por unidad de cuenca (píxel) (W)
 Q_{ij} = caudal medio anual acumulado (m^3/seg)
 H_{ij} = desnivel topográfico (m)
 9.81 = factor de aceleración de la gravedad (m/s^2)

Energía Teórica Anual a potencia continua: La Energía Teórica Anual en kW/h (E) a potencia continua resulta de referir el potencial bruto por píxel (P_i) a unidades de tiempo (Muguerza, 2005) [6]. Los factores representan las siguientes conversiones: 8760 horas al año; 1000 conversión de W a kW

$$E = P_i * \left(\frac{8760}{1000} \right) \quad [6]$$

CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL POTENCIAL HIDROELÉCTRICO TEÓRICO BRUTO

Para el cálculo de la densidad se definieron subcuencas dentro del área de trabajo. Las mismas se generaron aplicando el módulo 'watershade' del programa Idrisi Kilimanjaro (que las origina automáticamente a partir del MDE), siendo las mismas reclasificadas, ajustadas y nominadas en función de la cartografía de la zona (Núñez et al, 2007).

La densidad del P.H.T.B. (δ_i) en kW/km^2 , resulta de la relación entre la potencia total y el área de las subcuencas (A) en km^2 [7]. Tanto la sumatoria de potencias continuas (PHTB) [8] como la capa temática de superficies por subcuencas, fueron extractadas de los modelos mediante módulos matemáticos del programa Idrisi Kilimanjaro. El numeral 1000 es un factor de conversión de W a kW.

$$\delta_i = \frac{PHTB}{(A * 1000)} \quad [7]$$

Donde

$$PHTB = \sum P_i \quad [8]$$

POTENCIAL HIDROELÉCTRICO TÉCNICO APROVECHABLE (P.H.T.A.)

El P.H.T.A. representa aquel con factibilidad técnica de aprovechamiento, aunque evaluaciones de las condiciones económicas o físicas pudieran limitarlo en la práctica. No existen experiencias de monitoreo de este tipo de sistemas en las cuencas de la región Noroeste Argentino, y por ende tampoco índices regionales para el cálculo de este parámetro. Sin embargo, con fines orientativos se plantea en este trabajo el análisis del P.H.T.A., tomando como base los potenciales técnicos mínimos y máximos definidos en relación a la densidad específica del potencial bruto por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (Muguerza, 2005). Los valores de densidad de potencia calculados por subcuencas fueron reclasificados siguiendo estos lineamientos (Tabla 3).

Clase de PHTA	Densidad del PHTB	PHTA como % PHTB
1	< 10	00-25
2	10 – 50	00-30
3	50 – 100	05-35
4	100 - 150	10-40
5	150 - 200	15-45

Tabla 3. Valores utilizados para la clasificación de subcuencas en el Valle de Lerma según PHTA.

RESULTADOS

Como capas intermedias del modelado hidráulico se obtuvieron entre otros, mapas temáticos de volumen de entrada de agua, factor de infiltración, derrame medio anual, caudal medio anual, desnivel topográfico y subcuencas. Las capas finales representativas del potencial hidráulico con resolución a nivel de píxel fueron potencia continua y energía teórica anual. A nivel de subcuencas se obtuvieron capas temáticas para las variables: densidad de P.H.T.B. y P.H.T.A. Todas estas capas fueron integradas al SIG del Valle de Lerma, y en algunos casos sirvieron como base para el desarrollo de otros modelos digitales de interés para el proyecto general de Ordenamiento Territorial (ej.: estimación de pérdida de suelos mediante aplicaciones en contexto SIG de la RUSLE – Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada, mapeo de criterios de evaluación para alternativas de conservación, etc.). En las Figura 2Figura 5, pueden visualizarse algunas de las capas temáticas generadas en el proceso de modelado hidráulico.

Con respecto a los insumos del proceso, el volumen de entrada de agua varió entre 45 y 1906 m³/año/píxel, alcanzando los valores máximos en las laderas montañosas que circundan la zona de valle por el oeste, donde las precipitaciones son mayores (media anual = 1353 mm) y el terreno es fuertemente inclinado. Los valores mínimos de entrada de agua se registran en el vaso del valle donde la pendiente es muy baja y en las zonas más elevadas, donde el aporte de agua por precipitaciones es escaso. El factor de infiltración utilizado en el modelo, varió entre 0.0017 en los sectores poco permeables y/o de baja cobertura y 0.4664 para suelos permeables y con buena cobertura. Aproximadamente el 60% del área de trabajo presentó un factor de infiltración de 0.24, asociado a características de textura y cobertura del suelo moderadas. En relación al desnivel topográfico, los valores se ubicaron entre 0.1 y 80m por píxel. Porcentualmente, en el 60% del área de estudio el desnivel resultó menor a 10m, mientras que en un 30% se ubicó entre los 10 y 20 m. La Figura 2 muestra los caudales medios anuales acumulados sobre la red de drenaje. Los mismos varían entre 2 y 26 m³/s, según la ubicación y área de drenaje considerada como punto de cierre de la cuenca.

Los mapas de potencial hidráulico bruto y energía teórica anual, indicaron un potencial considerablemente mayor para el desarrollo de aplicaciones hidroeléctricas de pequeña escala en los sectores altos versus la zona de valle.

En base a un análisis de histogramas de estas variables energéticas surgieron los siguientes resultados:

- La potencia continua estimada por píxel (Figura 3) (900 m², mínima unidad de cuenca) resultó menor a 50W para un 40 % de la superficie estudiada, sin considerar el área ocupada por el embalse Cabra Corral, y se ubicó principalmente en la zona de valle intermontano. Un 18% presentó potencias entre 50-100W y un 31% entre 100-200W, representando particularmente el área montañosa.
- En correspondencia a estos valores, la energía de potencia continua estimada por píxel, presentó menos de 0.5mW/h en el área baja (43%), entre 0.5-1mW/h en la zona de piedemonte (21%) y entre 1-2mW/h en el sector montañoso (30%).

Dado que estos valores a nivel de píxel no resultan explícitos para evaluar el potencial hidráulico para la instalación de microturbinas, su análisis fue transferido al nivel de cuencas y subcuencas. El cálculo de la densidad de potencia nos permite visualizar mejor la calidad de las cuencas a los fines de su explotación energética (Muguerza, 2005). Con respecto a este parámetro (Figura 4), las subcuencas con mayor densidad de potencial teórico resultaron: Corralito (192 kW/km²), Usuri (187 kW/km²) y Huaico Hondo -afluente principal del Río de Las Nieves- (181 kW/km²). Con una densidad mayor a 150 kW/km², se destacaron por orden de importancia las subcuencas de Chilo-Ampatapa, Castellanos, Río de Las Nieves, La Calderilla, Cuesta Grande y Churqui.

La cuenca identificada con mayor densidad de PHTB (Corralito) coincide con el sector donde actualmente funciona la única Microcentral Hidroeléctrica existente en el área de trabajo (Belmonte et al, 2007). El sistema de microturbinas está basado en bocas de captación sobre diferentes tributarios (Ríos Puyil y Manzano), obras de regulación (pequeños embalses) y canales

de derivación a la central, que permiten asegurar el abastecimiento de agua durante todo el año. La misma se integra a la red nacional con un aporte de 13.2 mW (Secretaría de Energía, 2008).

Del análisis de P.H.T.A. (Figura 5), puede inducirse que el 49% del área de estudio presenta un potencial aprovechable de clase 4 y 5, representando un aprovechamiento del 10-45% del P.H.T.B (bajo supuesto de destino total de caudal disponible a producción energética). Del total de subcuencas analizadas, 9 presentan PHTA tipo 5 y 13, PHTA clase 4. Dentro del área de estudio no se detectaron subcuencas con densidades mayores a 200 kW/km².

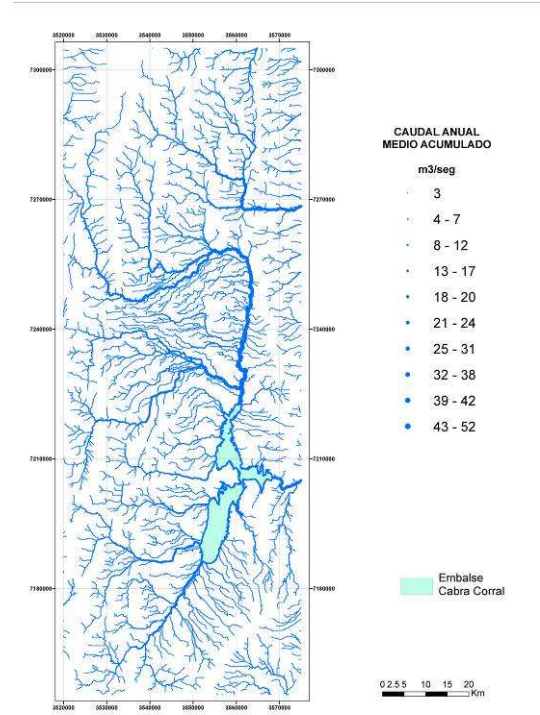


Figura 2. Caudal medio anual acumulado

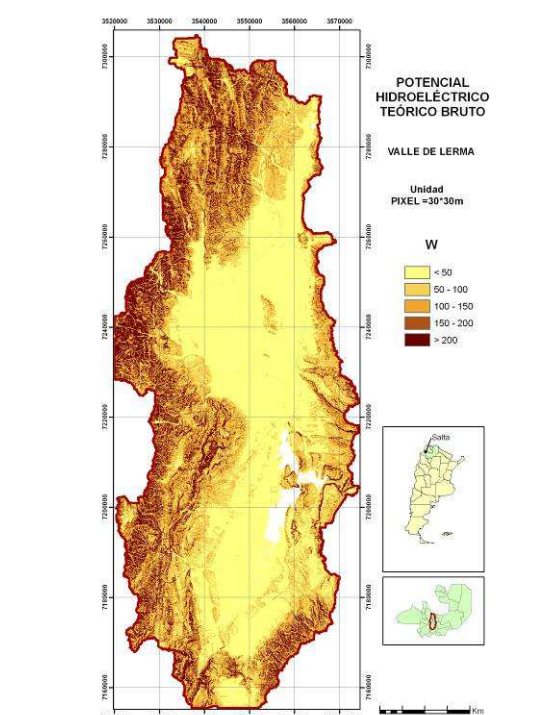


Figura 3. Potencial hidroeléctrico teórico bruto por píxel

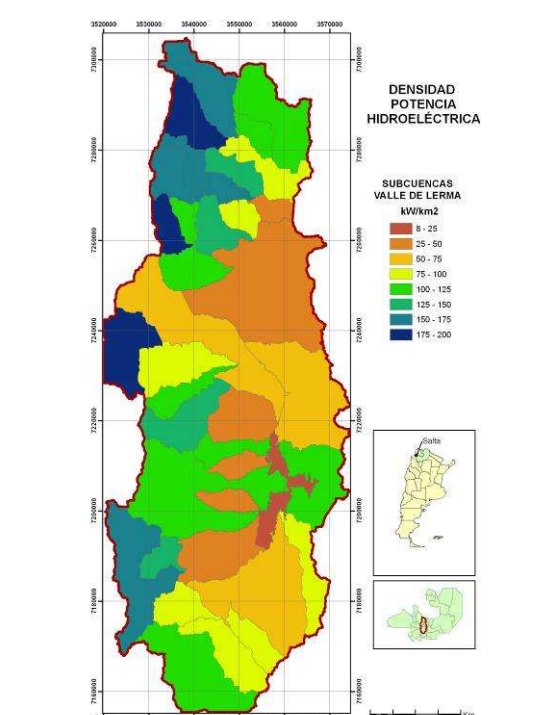


Figura 4. Densidad de P.H.T.B. por subcuencas

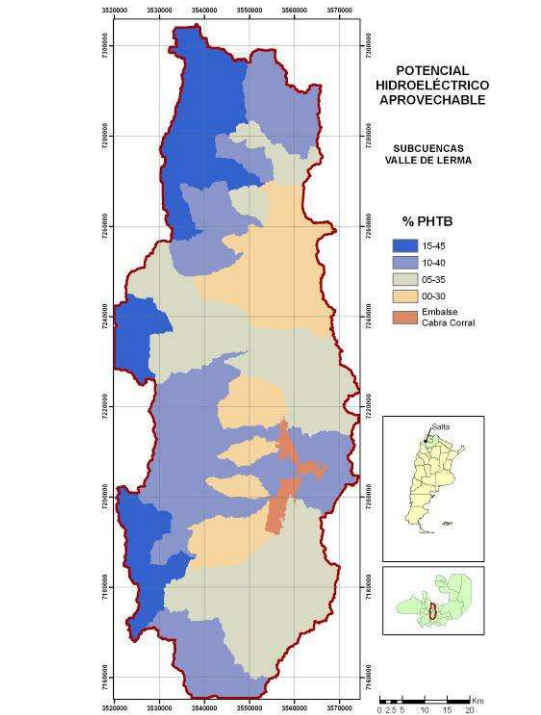


Figura 5. Potencial hidroeléctrico técnico aprovechable por subcuencas

CONCLUSIONES

En general, existe un potencial hidráulico elevado en el área del Valle de Lerma para la implementación de aprovechamientos energéticos de microturbinas. Las subcuencas hídricas con mayor potencial hidroeléctrico se localizan en las laderas montañosas que enmarcan por el oeste el Valle de Lerma, donde convergen condiciones de mayor entrada de agua (aumento de precipitaciones por efecto orográfico) y desnivel topográfico. Si bien los caudales medios anuales no son los máximos en la zona alta (en general los caudales se van acumulando hacia la zona baja), la fuerte topografía condiciona estos sectores como los más favorables para la implementación de microcentrales hidroeléctricas.

Los resultados obtenidos constituyen valores indicativos del potencial hidráulico de la zona, independientes de las tecnologías a aplicar. Sin embargo, las condiciones de variabilidad anual del régimen hídrico conducen a anticipar aplicaciones con obras de cierre y regulación para aprovechamientos a escala comunitaria. La posibilidad de instalación de microturbinas pequeñas para consumo familiar, del tipo centrales sin obra de cierre y/o “de pasada” que aprovechan caudales mínimos permanentes, requiere de estudios puntuales de localización, que exceden la visión regional de este trabajo. Estudios de factibilidad técnica, económica y social deberán realizarse asimismo para definir localizaciones puntuales de las obras. Además por las condiciones de torrencialidad de la zona, deberá incluirse para el diseño de las aplicaciones hidráulicas, un análisis detallado de los riesgos, considerando eventos de máxima y procesos erosivos frecuentes en la zona.

Los modelos digitales desarrollados para la evaluación del potencial hidroeléctrico para microturbinas se integraron al SIG, constituyendo una fuente de información clave para el análisis de alternativas energéticas renovables en el escenario de Ordenamiento Territorial del Valle de Lerma, Salta, Argentina. Finalmente, la metodología procesual explicitada para el modelado digital de las variables hidráulicas es factible de ser transferida y aplicada a situaciones geográficas y contextos de análisis diversos.

REFERENCIAS

- Belmonte S. y Núñez V. (2006a). **Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG**. Review of Geographical Information Science and Technology, GeoFocus, Informes y comentarios (6):15-27, <www.geo-focus.org>
- Belmonte S. y Núñez V. (2006b). **Estimación de caudales máximos y pérdida de suelos con herramientas SIG**. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Salta-Jujuy, Argentina. ISBN- 13: 978-978-21419-5-0.
- Belmonte S., Núñez V., Viramonte J. (2004) **Modelos Digitales Climáticos para el Valle de Lerma – Salta – Argentina**. Primera Reunión de Imágenes Satelitarias y SIG aplicada a la Gestión de los Recursos Naturales, Culturales y Medio Ambiente, Dpto. de Ingeniería de Minas. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
- Belmonte, S., et al (2006a). **Mapas de radiación solar para el Valle de Lerma (Salta – Argentina)**. Revista AVEREMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente) V 10 (2006): 11-49 a 11-56.
- Belmonte, S., et al (2006b) **Mapa eólico del Valle de Lerma (Salta – Argentina)**. Revista AVEREMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente) V 10 (2006): 06-23 a 06-29.
- Belmonte, S. et al (2007). **Situación actual y perspectivas de energías renovables en el Valle de Lerma – Salta**. Revista AVEREMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente) V 11:12.55-12.62.
- Idrisi Kilimanjaro (2004). **Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes**. Manual en español. Clark Labs University, Worcester MA, USA.
- Menéndez M. A., Moreno R., Núñez V. (2002). **Clasificación de la Vegetación del Valle de Lerma a partir de Imágenes Landsat**. Informe final. Proyecto N°697. Consejo de Investigación Universidad Nacional de Salta, Argentina.
- Muguerza, D. (2005). **Microcentrales Hidroeléctricas**. Maestría y Especialización en Energías Renovables. Universidad Nacional del Nordeste. Universidad Nacional de Salta. Argentina.
- Nadir A. y Chafatinos, T. (1990). Los Suelos del NOA (Salta y Jujuy). Tomo I. UNSA. SUBCyT. SEAA.
- NASA (2006). <<http://srtm.usgs.gov>>
- Núñez V. et al. (2007). **Ordenación Territorial del Valle de Lerma. Parte II: Pautas para la planificación**. Cartografía digital. Proyecto N°1345. CIUNSA Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta, Argentina.
- Ramakrishna, B. (1997). **Estrategia de extensión para el Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas: Conceptos y experiencias**. S. Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible, T 3, //CA – BMZ/GTZ, San José, Costa Rica.
- Secretaría de Energía. Nación Argentina (2008). <<http://energia3.mecon.gov.ar>>
- Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable (1997). **Estadística hidrológica**. Tomo I. Subsecretaría de Recursos Hídricos, Presidencia de la Nación. Argentina.
- Vich A. I. J. (1999). **Aguas continentales. Formas y Procesos**. Manual de aplicaciones prácticas. CONICET, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- Villanueva G., Osinaga R., Chavez A. (2002). **Manual de tecnología de los suelos agrícolas. El uso sustentable de los suelos**. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Argentina.

ABSTRACT: This work represents the models developed for hydroelectric potential mapping in the Lerma Valley, Salta. The digital modeling was made in the GIS environment (Geographic Information System), making use of the concept of spacial accumulation per pixel (“runoff” module) and other processing tools of the Idrisi KilimanjaroTM program. As inputs were used different layers with data of: Infiltration factor (based on soil texture and land use and cover units), incoming water volume, Digital Elevation Model, annual overflow, medium flow and topographic gradient. The variables used for the hydraulic potential evaluation were: theoretical brute hydroelectric potential - theoretical annual energy at continuous power for a pixel resolution level and hydroelectric power density and technically exploitable potential for watershed. The mapping tasks let us to detect a high hydraulic potential for energy generation by means of microturbinas in the mountain area of the Lerma Valley.

KEY WORDS: hydraulic potential, microturbinas, GIS, watershed, renewable energies, Lerma Valley.